

光学学报

基于激光截面成像法的气液两相流气泡群特征测量

谭万尧¹, 刘晓晶², 吴德操^{1*}, 罗彬彬^{1**}, 赵明富¹, 郭裕丰¹, 龙俊宇¹, 张颖¹

¹重庆理工大学光纤传感与光电检测重庆市重点实验室, 重庆 400054;

²上海交通大学核科学与工程学院, 上海 200240

摘要 针对核反应堆热工设计与建模中堆芯气液两相流参数的测算需求, 研究了一种基于激光成像的气泡群特征测量方法。在透明模型堆芯外部使用平面激光照射两相流形成横向探测截面, 通过高速摄影获取气泡群在该截面处的前向光散射图像, 利用圆度值分类法和优化的快速径向对称变换图形分割算法对图像进行处理, 有效降低了气泡影像重叠引入的面积计算误差。基于气泡“断层轮廓-速度-形态”的约束关系, 完成了气泡垂直速度的求解, 最终所提方法实现了瞬时截面含气率测量、截面含气率均值成像、气泡三维形态重建和平均粒径分布计算。

关键词 图像处理; 激光成像; 棒束通道; 图像分析; 含气率

中图分类号 TL375.5

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1510001

Measurement of Bubble Group Characteristics of Gas-Liquid Two-Phase Flow by Laser Cross Section Imaging

Tan Wanyao¹, Liu Xiaojing², Wu Decao^{1*}, Luo Binbin^{1**}, Zhao Mingfu¹, Guo Yufeng¹, Long Junyu¹, Zhang Ying¹

¹Chongqing Key Laboratory of Optical Fiber Sensor and Photoelectric Detection, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

²School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract According to the measurement requirements of the gas-liquid two-phase flow parameters in thermal design and modeling of a nuclear reactor, a laser-imaging-based method for measuring the characteristics of bubble groups is investigated. Specifically, a planar laser is used to illuminate the two-phase flow outside the transparent model core to form a transverse detection cross-section, and the forward light scattering images of the bubble groups in this cross-section are obtained by high-speed photography. Then, the images are processed with a roundness classification method and an optimized graph segmentation algorithm of the fast radial symmetry transform to effectively reduce the area calculation errors introduced by the overlapping bubble images. Finally, the vertical velocity of the bubbles is calculated on the basis of the "fault contour-velocity-morphology" constraint of bubbles. Thus, the proposed method achieves the measurement of the instantaneous cross-sectional void fraction, the imaging of the mean value of cross-sectional void fraction, the three-dimensional morphology reconstruction of bubbles, and the calculation of average particle size distribution.

Key words image processing; laser imaging; rod bundle channel; image analysis; void fraction

1 引言

目前核电站压水反应堆中, 一般允许冷却剂流过

燃料棒束通道时出现欠热沸腾, 进而大幅提高堆芯的出口温度和换热系数。然而, 这也使得堆内产生大量气泡, 形成气液两相流。由于气泡的传热系数极低, 为

收稿日期: 2022-01-07; 修回日期: 2022-02-28; 录用日期: 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金重点基金项目(U20B2011)、重庆市教委科学技术研究计划青年项目(KJQN202001117)、重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0243)、重庆市教委科学技术研究计划重点项目(KJZD-K201905601)、重庆英才计划包干制项目(cstc2021ycjh-bgzxm0128)、重庆市研究生创新项目(CYS20350)、重庆理工大学研究生创新项目(clgyxc20202034)

通信作者: *wudecao@163.com; **luobinbin@cqut.edu.cn

了不影响棒束加热面的传热效果,故必须严格控制两相流的截面含气率^[1]。否则,一旦出现膜态沸腾,燃料棒表面将长时间被气膜覆盖,这会导致堆芯处出现强烈的压力变化,产生高温、震动、噪声和燃料棒侵蚀等现象,甚至造成棒体断裂和堆芯熔化事故。若能在反应堆结构设计和方法验证阶段准确建立相应的两相流热工与水力学分析模型,测算堆芯运行时的压力分布和传热特性,则可为后续反应堆的可靠运行提供有力的安全保障^[2]。

热工建模需要获取堆芯棒束通道内气泡的体积、数量、速度和分布等参数,一般可通过构建堆芯结构模拟实验装置产生两相流,借助光学或电学方法进行检测,这些方法大致可分为探针法和高速影像法两类。其中,探针法利用气泡接触探针时的电导率或反射光强变化,获取气泡的大小和速度参数。由于该方法具备一定的高温高压耐受能力,故成为了当前的主流方法。Ren等^[3]利用四传感电导率探针对 5×5 的棒束通道局部两相流的含气率、气泡速度和气泡弦长等参数进行了检测。Lichti等^[4]通过使用改进的光学多模在线光纤探头对鼓泡塔内局部气泡的尺寸分布进行了分析,能够得到气泡粒径范围在 $166 \mu\text{m} \sim 7 \text{mm}$ 范围内的气泡的分布。然而,单探针无法实时获得气泡在截面上的分布信息,引入多探针则可能扰乱体系内部气泡的固有运动规律,因此不具备多维度同步探测能力。

影像分析法是一种非接触式测量法,通过放置于流道侧面的相机高速拍摄并获取气泡的运动特征,能够得到瞬时的全场流动信息。Akihiro等^[5]利用高速相机测量了不同体积流量下的 4×4 棒束通道的含气率,

并检验了流型与含气率关系式的适用性。洪文鹏等^[6]使用图像分析的方式对不同流型棒束管道气液两相流截面图像进行了含气率计算,并对比分析了测量值与理论含气率值,误差范围在15%以内。该方法要求对堆芯模拟装置进行透明化处理,对于高温承压条件下的模态分析,则需引入特制的蓝宝石玻璃容器^[7]。

然而,影像法在气泡数量较多时,由于气泡群影像的重叠问题会造成严重的测量误差,故该方法一般仅能分析垂直方向上数个气泡构成的气泡序列,这限制了该方法的应用范围。鉴于此,本文通过引入面状激光照射实现气泡群的横截面成像,使用优化的图形分割算法有效解决了粘连、重叠气泡图像的截面积计算问题,实现了高精度、多参数的气泡群特征测量。

2 原理与方法

2.1 系统设计

本文采用的实验系统为常温常压堆芯模型,如图1所示,由堆芯模拟池、气泡发生器、气泡成像激光器、高速相机和电导探针法气泡测速装置等构成,其中堆芯模拟池为 $40 \text{mm} \times 40 \text{mm} \times 500 \text{mm}$ 的透明长方体结构,池内注水并插入9根外径为 9.5mm 的中空透明密封管束,组成 3×3 的模拟燃料棒阵列。池体和管束选用亚克力材料,高温测量条件下亦可使用石英材料替代。为了减弱由管束材料与水折射率不同引入的光学畸变,管体采用 0.5mm 薄壁设计,并在管内注水。气泡发生器由蠕动泵与微孔陶瓷块组成,可产生气体流量精确可控的向上气泡群。

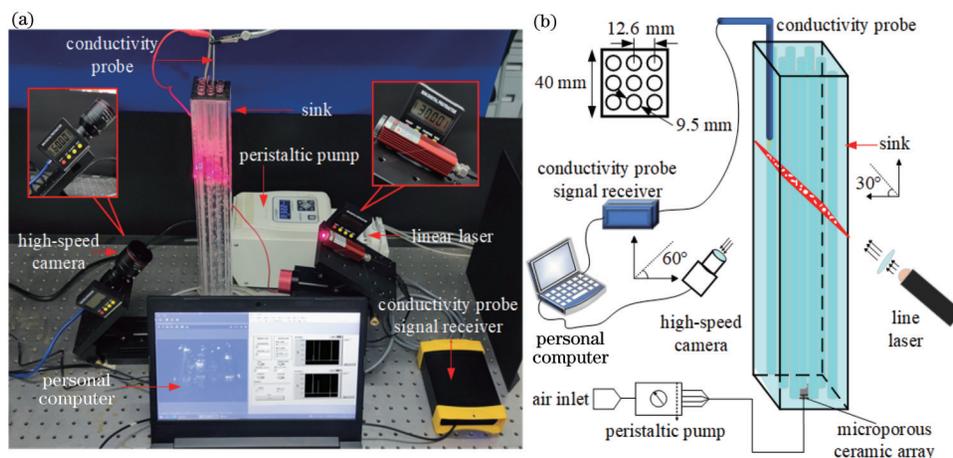


图 1 气泡图像采集装置。(a)实物图;(b)示意图

Fig. 1 Bubble image acquisition device. (a) Physical picture; (b) schematic diagram

成像激光器是功率为 40mW 、中心波长为 650nm 的激光器,结合鲍威尔棱镜阵列可输出厚度约 0.7mm 的一字扇面光束,并以水平 30° 倾角照射堆芯模拟池中段,形成探测截面。当气泡群经过探测截面时,将引发强烈的光散射,形成影像信号。此时,将杭州海康威视数字技术股份有限公司生产的MV-CA004-10UM高速相机置于激光器的对向侧,垂直于探测截面,以

800frame/s 的帧率在暗室环境中采集气泡形态的图像序列,并进一步计算得到气泡群的特征参数。此处,激光器倾斜照射的目的是使探测截面能与相机垂直,从而减小图像畸变。

检测流程如图2所示,主要分为图像预处理、气泡分类、重叠气泡图像分割和气泡群特征参数提取这4个步骤。

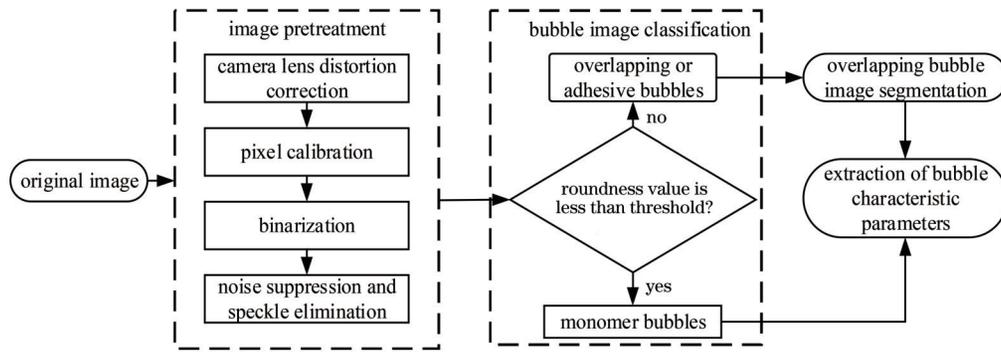


图 2 气泡特征参数提取实验流程图

Fig. 2 Flow chart of bubble characteristic parameter extraction experiment

2.2 图像预处理

预处理环节主要对原始图像进行相机镜头畸变校正、像素标定、散斑消除、二值化和噪声抑制处理。首先,将单元格大小为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的棋盘格标定板放置于与激光照射截面相同的位置,使用相机获取其图像,如图 3 所示。利用多项式坐标变换法^[8]完成镜头畸

变校正和像素比例尺计算,可得每个像素面积约为 0.0204 mm^2 。另外,由于采集的图像并非垂直于流道,故还需对图像进行三维坐标转换。根据三维齐次坐标的坐标转换规则^[9],将图像坐标系绕 X 轴逆时针旋转 30° 。

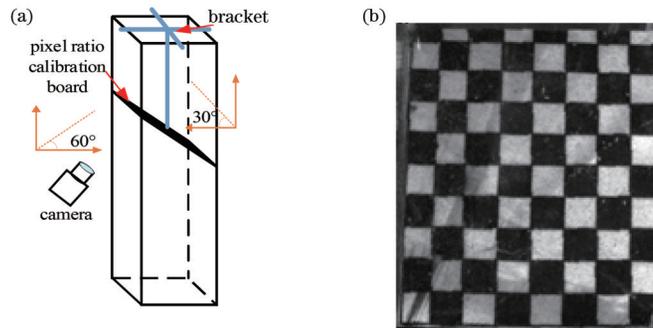


图 3 标定图像的拍摄方式和相机获取的标定原始图像。(a) 标定图像的拍摄方式;(b) 相机获取的标定原始图像

Fig. 3 Shooting method of calibration image and original calibration image obtained by camera. (a) Shooting method of calibration image; (b) original calibration image obtained by camera

然后,启动激光器,记录无气泡条件下的背景图像,用于差分消除流道壁和棒束上由激光直射产生的少量干扰光斑。接着,释放气泡并连续记录探测截面上的气泡图像。截面上气泡的散射光在接触截面外其他气泡时会发生二次散射,在图像中形成伪影,如图 4 (a)所示。为了避免后续算法出现误判,根据二次散射光强远低于一次散射的特性,使用最大类间方差法对原灰度图像进行二值化处理,得到截面气泡轮廓图,如

图 4(b)所示。然而,截面上气泡间的相互光散射使得气泡轮廓仍包含较多噪声,考虑采用大小为 $3\text{ pixel} \times 3\text{ pixel}$ 的中值滤波消除散点噪声,并进一步利用高斯滤波降低随机噪声,从而大幅提高轮廓对比度,如图 4 (c)所示。需说明的是,该过程可能会滤除部分微气泡信息,但由于微气泡体积很小,故对后续含气率计算的影响不大。

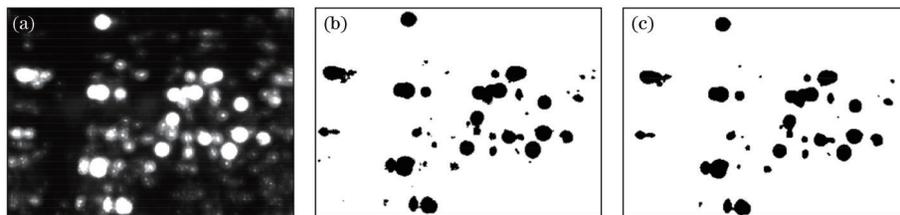


图 4 气泡图像预处理。(a) 典型气泡图像;(b) 反色二值化图像;(c) 滤波后的图像

Fig. 4 Bubble image preprocessing. (a) Typical bubble image; (b) binary image with inverted color; (c) filtered image

2.3 气泡分类

经过 2.2 节的预处理后,按连通域特征对气泡图像进行圆度值分类^[10],其中圆度值表示气泡接近圆形的程度。圆度阈值 R_0 的表达式为

$$R_0 = \frac{L}{2\sqrt{\pi s}}, \quad (1)$$

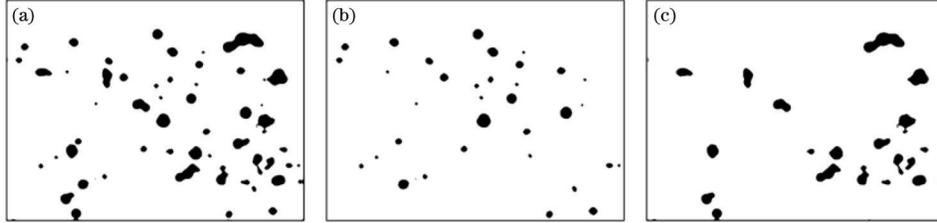


图 5 圆度值分类前后的气泡图像。(a)圆度值分类前的原始气泡图像;(b)规则气泡图像;(c)不规则气泡图像

Fig. 5 Bubble images before and after roundness value classification. (a) Original bubble image before roundness value classification; (b) regular bubble image; (c) irregular bubble image

2.4 气泡群特征参数提取

对于分类后的规则气泡图像,其面积、数量和位置分布等形态特征参数可直接采用最小二乘椭圆拟合法^[11]提取,然后利用椭圆参数实现各气泡的特征分析和统计,计算开销较小。

然而,分类为多气泡粘连或重叠的气泡图像,由于其中每个气泡仍可近似为径向对称的椭圆,故采用快速径向对称变换法(FRS)^[12]进行粘连气泡的分割,再结合椭圆拟合完成轮廓估计与数据拓展,具体算法流程如图 6 所示。

1) 基于 FRS 变换计算图像空间中每个边缘像素对径向半径 $[R_{min}, R_{max}]$ 内所有像素的对称贡献,然后将其转换为突出图像梯度的局部径向对称图,进行阈值分割得到二值图。

2) 求取二值图像连通域的质心坐标,并以此作为

种子点,使用距离度量和梯度度量两个指标计算每个边缘与种子点的相关度,从而得出与每个种子点最相关的边缘像素。

3) 对每个种子点的边缘像素集进行直接椭圆拟合,从而推断重叠对象边缘像素集的缺失部分,达到对重叠或粘连气泡进行分割的目的。

4) 该算法中对分割结果影响最密切的是 FRS 变换中径向半径 $[R_{min}, R_{max}]$ 的选取。为了确定径向半径的优值,定义目标图像中最小气泡与最大气泡的等效半径为 r_{min} 和 r_{max} ,并将二者作为搜索的上限和下限,以椭圆拟合度为优化目标进行循环迭代。优值判别条件的定义为输出拟合椭圆的两两重叠度小于 0.7,且除去重叠后的椭圆总面积与原始未分割的连通域面积之比大于 0.95 且小于 1.05。

种子点,使用距离度量和梯度度量两个指标计算每个边缘与种子点的相关度,从而得出与每个种子点最相关的边缘像素。

3) 对每个种子点的边缘像素集进行直接椭圆拟合,从而推断重叠对象边缘像素集的缺失部分,达到对重叠或粘连气泡进行分割的目的。

4) 该算法中对分割结果影响最密切的是 FRS 变换中径向半径 $[R_{min}, R_{max}]$ 的选取。为了确定径向半径的优值,定义目标图像中最小气泡与最大气泡的等效半径为 r_{min} 和 r_{max} ,并将二者作为搜索的上限和下限,以椭圆拟合度为优化目标进行循环迭代。优值判别条件的定义为输出拟合椭圆的两两重叠度小于 0.7,且除去重叠后的椭圆总面积与原始未分割的连通域面积之比大于 0.95 且小于 1.05。

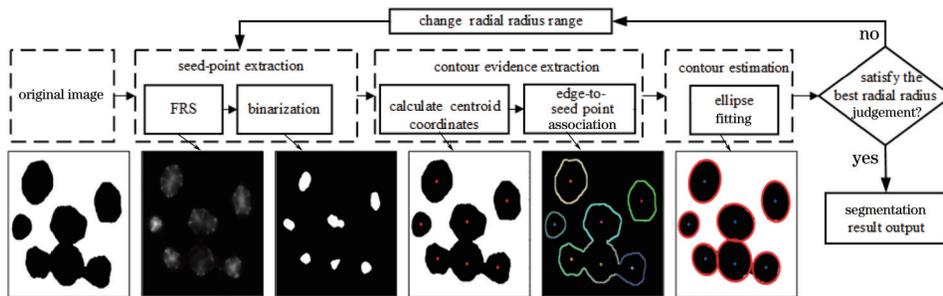


图 6 重叠或粘连气泡分割算法流程

Fig. 6 Flow chart of overlapping or adhesive bubble segmentation algorithm

值得一提的是,虽然该迭代过程的计算量较大,但是在对多帧图像序列进行连续分割时,由于气泡特征在一段时间内变化很小,故可通过存储多组历史优值,并对其进行优先判别,实现分割速度的大幅提高。经统计,对 800 帧图像进行分割处理,引入历史优值判别后,计算时长可由 35 min 降至 5 min 左右。

图 7 为三幅典型的气泡重叠与粘连图像,在经过径向半径取值优化后,所提算法可得到较好的分割

效果。

在对两类气泡图像进行特征提取后,统计气泡的数量与面积信息,即可计算出液相内的截面含气率 α ,其表达式为

$$\alpha = \sum a_n / A, \quad (2)$$

式中: a_n 为图像分割后第 n 个气泡所占的像素面积; A 为流道总像素面积。

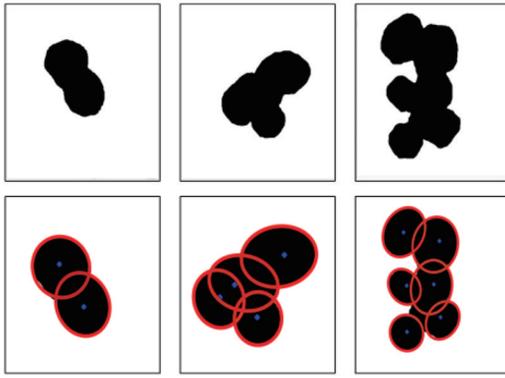


图 7 典型重叠或粘连气泡分割结果示意图

Fig. 7 Schematic diagram of segmentation results of typical overlapping or adhesive bubbles

3 数据分析与讨论

3.1 瞬时截面含气率测量

利用图 1 所示的实验装置,分别设置 40, 60, 80, 100 mL/min 4 组进气量,对连续 50 帧气泡图像序列中的瞬时气泡数量和含气率进行统计,结果如图 8 所示。其中,虚线为气泡数量和含气率的数值平均(AVG)。

从图 8 可知,所提方法所获取的气泡数量和含气率均与进气量正相关,但由于气泡发生器输出的气泡

体积和数量具有较强的随机性,故各帧图像间的气泡参数存在较大波动,而含气率均值在当前低进气量条件下呈现等差变化的规律。

需要说明的是,进气量与含气率并不满足正比关系,一般要借用与流道特征相关的质量含气率计算模型进行描述。其中,质量含气率代表了单位时间内流过通道某一截面的两相流体总质量中气相所占的比例份额,由进气量换算得到。图 9(a)展示了不同进气量条件下实验测得的 50 帧均值含气率随质量含气率变化的曲线,同时绘制了米洛波尔斯基滑速比模型、Smith 混合相-单相模型、Bankoff 变密度模型和均相模型^[13-16] 4 种质量含气率计算模型的预测曲线进行对比。

由于仅有米洛波尔斯基模型考虑了内插多根棒束时的流道特性,故其预测结果与实验数据符合得较好。然而,当质量含气率持续增大时,两相流流型可由泡状流转变为弹状流等其他流型,其中过量的粘连和重叠气泡图像将使截面含气率的测量误差增大。本文主要考虑泡状流型的测量,如图 9(b)所示。可以发现:当前进气量在 0~180 mL/min 范围时,所提方法的测量值与理论值误差在 5% 以内;当气流量扩展至 300 mL/min 时,误差也仅为 10% 左右。相比传统的直接影像拍摄法,所提方法已具备明显更宽的含气率量程和更高的测量精度。

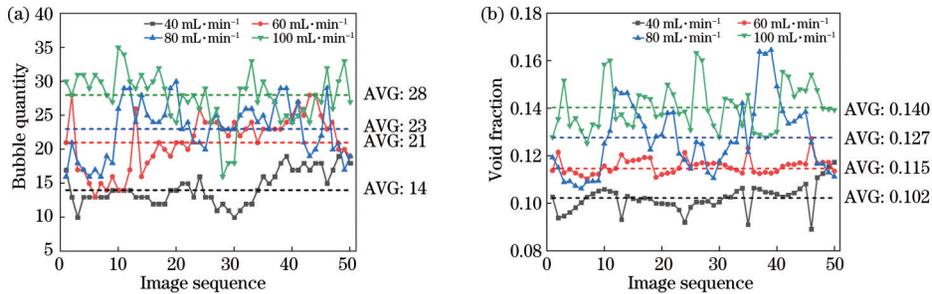


图 8 瞬时气泡数量统计和瞬时含气率曲线。(a)瞬时气泡数量统计;(b)瞬时含气率曲线

Fig. 8 Instantaneous bubble quantity statistics and instantaneous void fraction curve. (a) Instantaneous bubble quantity statistics; (b) instantaneous void fraction curve

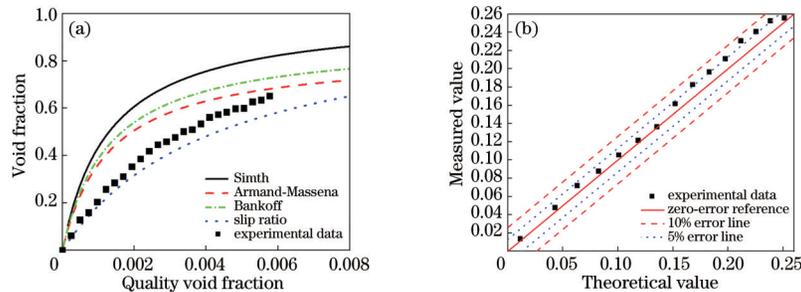


图 9 截面含气率分析。(a)含气率随质量含气率的变化曲线;(b)含气率实测值与理论值误差分析

Fig. 9 Analysis of cross-sectional void fraction. (a) Void fraction varying with quality void fraction; (b) error analysis of void fraction between measured value and theoretical value

3.2 截面含气率均值成像

由于所提方法能够准确测量气泡在截面中的位置和面积,因此通过多帧累加方式对气泡群像面进行二维

积分,可以实现截面含气率均值成像。实验分别设置进气量为 60 mL/min 和 100 mL/min,对 10 s 内拍摄的 8000 帧图像进行处理,得到的成像结果如图 10 所示。

图 10 中各燃料棒位置显示清晰,并可观察到棒束间子通道内含有较高的含气率,说明气泡群倾向于在子通道中心聚集,呈现典型的中心峰分布^[17]。此外,还

能分辨出通道右侧的含气率明显高于左侧,这是气泡发生器被安装在右侧棒束缝隙内,气泡上升时受燃料棒阻挡尚未均匀分布造成的。

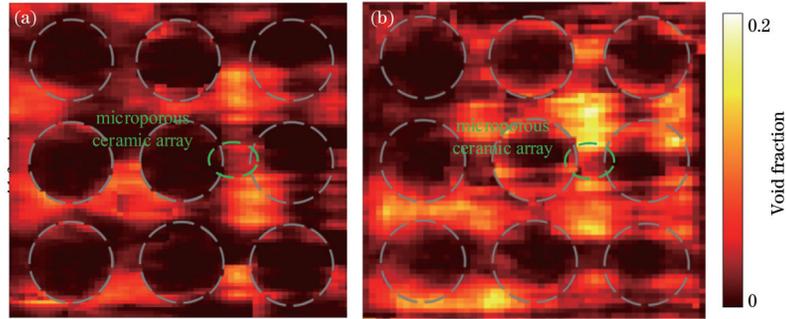


图 10 截面含气率均值成像

Fig. 10 Imaging of mean value of cross-sectional void fraction

3.3 气泡三维重建和平均粒径分布测量

因为每个气泡在图像序列中的影像一般具有上下连通性,通过前后帧的重叠判断能够确定该气泡穿过探测截面时的多个断层轮廓,如图 11(a)所示。此过程时间很短,期间可认为速度基本不变。因此,当瞬时垂直速度已知时,即可计算得到该气泡的三维形态,整体上则能实现气泡群的三维重建。然而,所提方法无法直接获取气泡速度,进而考虑通过形态建模对其进行间接求解。

气泡和流体的相对速度与气泡三维形态密切相关,即:当速度为零时,受表面张力的影响气泡呈现正圆形;随着速度的增加,流体阻力迅速增大,气泡将逐渐变为椭球形;大型气泡在高速运动时还可呈现草帽形等其他复杂形态。该过程可由流体体积(VOF)模型^[18]精确描述。基于断层轮廓-速度-气泡形态的约束关系,即可实现气泡垂直速度求解。然而,VOF 模型

的计算开销相当大,进而当气泡数量众多时难以实现快速分析。本文在不考虑大型气泡(直径大于 10 mm)的条件下,基于气泡圆度值 R_0 与流体无量纲参数 We (Weber 数)和 Re (雷诺数)的简化关系^[19]进行垂直速度解算,这样可在满足计算精度的同时,有效降低求解的计算量。相应的表达式为

$$\begin{cases} R_0 = 0.9943 + 0.0007 \times (Re)^{0.6626} \times (We)^{0.1197} \\ We = \frac{\rho_1 v_T^2 d}{\sigma} \\ Re = \frac{\rho_1 v_T d}{\mu_1} \end{cases}, (3)$$

式中: R_0 的定义与式(1)相同,但由横向剖面圆度值改为计算气泡纵向剖面的最大圆度值; d 为气泡椭圆拟合等效圆直径; ρ_1 为液体密度; σ 为表面张力; μ_1 为液体黏度; v_T 为气泡速度。本实验的水温为 9 °C,此时水的物性参数如表 1 所示。

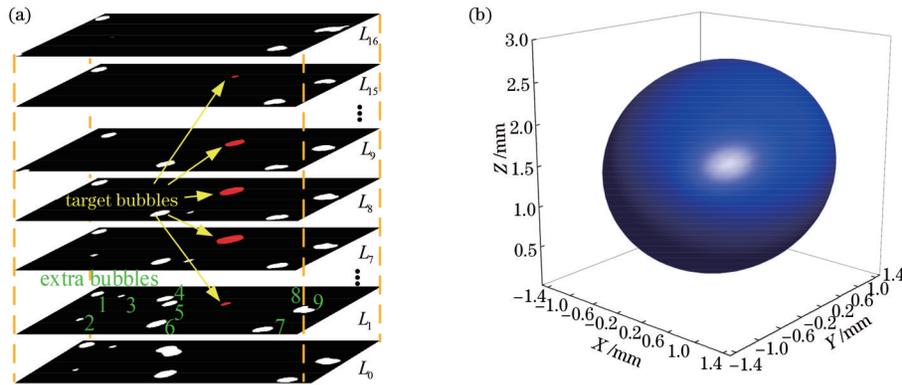


图 11 目标气泡追踪图像和气泡椭球重建。(a)目标气泡追踪图像;(b)气泡椭球重建

Fig. 11 Target bubble tracking image and bubble ellipsoid reconstruction. (a) Target bubble tracking image; (b) bubble ellipsoid reconstruction

求解过程以图 11(a)中的目标气泡为例,首先定义 v_T 迭代搜索的初值为 0.05 m/s,利用追踪到的 15 帧图像序列获取气泡轮廓集合,结合当前 v_T 取值进行椭圆拟合,并计算得到对应的 R_0 和 d ,然后代入式(3)得

到 v_T 。逐步增加 v_T ,直至 v_T 与 v_T' 近似相等时,将此时的值作为 v_T 的有效解。最终,计算得到的该气泡的速度为 0.159 m/s,椭圆拟合结果如图 11(b)所示,可得到该气泡的粒径为 2.66 mm。

表 1 液相物性参数

Table 1 Physical parameters of liquid phase

Temperature / °C	$\rho_1 /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\mu_1 /$ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	$\sigma /$ ($\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$)
8	999.8	1.38	74

经测试,当气泡在图像序列中的连通影像超过 5 帧时,即可得到稳定的速度和形态求解结果。图 11 (a)中 L_1 帧处额外的 9 个气泡也均满足此条件,其求解结果如表 2 所示。其中,气泡粒径为与之同体积的球体直径。

在 60 mL/min、100 mL/min 气流量下分别采集 800 帧(1 s)气泡图像集进行气泡群重建。各追踪到 1149 个气泡和 1487 个气泡,得到的粒径分布如图 12 所示,计算开销分别为 27 min 和 34 min,与气泡数量成正比。由图 12 可知,当前系统的气泡粒径主要分布在 1.6~3.6 mm 范围内。随着气流量的增加,气泡平均

表 2 多个气泡的粒径和速度分析

Table 2 Particle size and velocity analysis of multiple bubbles

Bubble No.	Particle size /mm	Velocity /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	2.06	0.140
2	1.05	0.136
3	1.09	0.134
4	2.27	0.143
5	2.39	0.144
6	2.56	0.153
7	2.64	0.159
8	2.33	0.142
9	2.30	0.142

粒径稍有增加,但仍以小粒径气泡为主,这与微孔陶瓷气泡发生器的特点和泡状流条件下气泡聚合概率较小的特征相符。

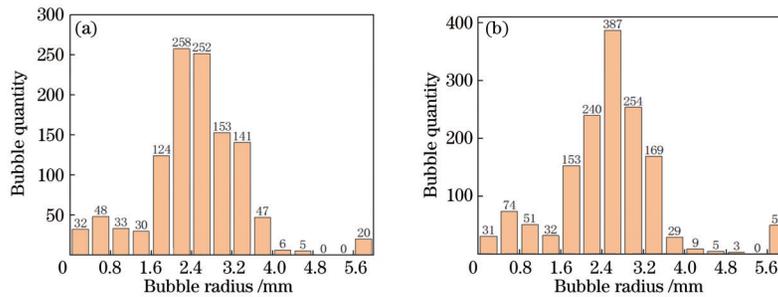


图 12 不同气流量下气泡群粒径的分布直方图。(a) 60 mL/min; (b) 100 mL/min

Fig. 12 Histogram of bubble group particle size distribution at different gas flow rates. (a) 60 mL/min; (b) 100 mL/min

由于电导率探针法仅能获取气泡群的均值特征,将粒径分析实验中统计得到的均值数据与之对比,结果如表 3 所示,相互偏差小于 10%。考虑到探针法测

量数据同样包含一定的不确定度,因此该偏差在合理范围内。

表 3 气泡群特征均值统计

Table 3 Mean statistics of bubble group characteristics

Scene No.	Gas flow / ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	Average velocity of image method / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Average velocity of conductivity method /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Error rate of average velocity /%	Average particle size of image method /mm	Average particle size of conductivity method /mm	Error rate of average particle size /%
1	60	0.152	0.155	2.07	2.47	2.40	-2.91
2	100	0.157	0.164	4.03	2.54	2.61	6.27

4 结 论

讨论了通过激光横截面成像方式实现反应堆堆芯两相流气泡群特征参数的测量方法。基于该方法的瞬时含气率测量值与滑速比模型的理论计算值在泡状流区间内误差低于 10%。含气率均值成像测量中能够分辨气泡群的峰值分布特征。将测得的平均速度和平均粒径与电导探针法测量数据相比,互偏差小于 10%。从量程和精度上来看,所提方法均优于传统的纵向面图像法,且气泡特征参数的测量种类更加丰富。

与探针法相比,所提方法不会扰乱内部流场,能获取更高维度的气泡分布信息,这对反应堆热工设计中分析不同工况对气泡分部特性的影响具有实用价值。在后续研究中,可进一步拓展所提方法在生物、化工等两相流测量相关领域中的应用。

参 考 文 献

[1] 李博西. 空泡对核反应堆安全影响的初步分析[J]. 科技创新导报, 2016, 13(7): 63, 65.
Li B X. Preliminary analysis of the effect of cavitation on

- nuclear reactor safety[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2016, 13(7): 63, 65.
- [2] le Corre J M, Bergmann U C, Hallehn A, et al. Measurements of local two-phase flow parameters in fuel bundle under BWR operating conditions[J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, 336: 15-23.
- [3] Ren Q Y, Pan L M, Zhou W X, et al. Phase distribution characteristics of bubbly flow in 5×5 vertical rod bundles with mixing vane spacer grids[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 96: 451-459.
- [4] Lichti M, Bart H J. Bubble size distributions with a shadowgraphic optical probe[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2018, 60: 164-170.
- [5] Akihiro K, Shigeo H, Akio T, et al. Void fraction in a four by four rod bundle under a stagnant condition[J]. Journal of Power and Energy Systems, 2010, 4(2): 315-326.
- [6] 洪文鹏, 刘燕, 周云龙. 基于图像处理的管束间气液两相含气率的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(11): 74-78.
Hong W P, Liu Y, Zhou Y L. Investigation on gas-liquid two-phase flow void fraction across tube bundles based on images processing method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(11): 74-78.
- [7] Su G. Thermohydraulics and suppression of nucleate boiling in upward two-phase annular flow: probing multiscale physics by innovative diagnostics[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2018: 52-63.
- [8] 林御寒, 石惠, 贾天卿. 对基于时空干涉的空间整形的畸变与光强校正[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0314002.
Lin Y H, Shi H, Jia T Q. Distortion and light intensity correction for spatiotemporal-interference-based spatial shaping[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0314002.
- [9] 谭舸, 花向红, 陶武勇, 等. 基于激光跟踪仪的多测站地面激光扫描点云配准方法[J]. 中国激光, 2021, 48(17): 1710002.
Tan G, Hua X H, Tao W Y, et al. Multiview terrestrial laser scanning point cloud registration method based on laser tracker[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1710002.
- [10] 杨程. 图像分析技术用于液相中气泡群粒径分布的检测[D]. 南京: 南京大学, 2015: 29-30.
Yang C. The digital image analysis technique for the determination of bubble size distribution in liquid phase [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015: 29-30.
- [11] 潘登, 李艳丽, 高东, 等. 基于椭圆拟合的多光斑/重叠光斑中心提取方法[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1410001.
Pan D, Li Y L, Gao D, et al. Center extraction method of multiple and overlapping faculae based on ellipse fitting [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1410001.
- [12] Zafari S, Eerola T, Sampo J, et al. Segmentation of overlapping elliptical objects in silhouette images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(12): 5942-5952.
- [13] Bankoff S G. A variable density single-fluid model for two-phase flow with particular reference to steam-water flow[J]. Journal of Heat Transfer, 1960, 82(4): 265-272.
- [14] Hibiki T, Mao K Y, Ozaki T. Development of void fraction-quality correlation for two-phase flow in horizontal and vertical tube bundles[J]. Progress in Nuclear Energy, 2017, 97: 38-52.
- [15] Smith S L. Void fractions in two-phase flow: a correlation based upon an equal velocity head model[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1969, 184(1): 647-664.
- [16] 孙宏军, 冯越. 基于滑速比模型的气液两相流截面含气率计算方法评价[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7): 983-991.
Sun H J, Feng Y. Evaluation on void fraction correlations for gas-liquid two-phase flow based on slip model[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(7): 983-991.
- [17] Mizutani Y, Tomiyama A, Hosokawa S, et al. Two-phase flow patterns in a four by four rod bundle[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2007, 44(6): 894-901.
- [18] Huang Y, Gao P Z, Wang C Q. Experimental and numerical investigation of bubble-bubble interactions during the process of free ascension[J]. Energies, 2019, 12(10): 1977.
- [19] 闫红杰, 赵国建, 刘柳, 等. 静止水中单气泡形状及上升规律的实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(7): 2513-2520.
Yan H J, Zhao G J, Liu L, et al. Experimental study on shape and rising behavior of single bubble in stagnant water[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(7): 2513-2520.